Archive of SID

تحلیل ظرفیت مقاطع پایه بزرگراهی
(مطالعه موردی: بزرگراه شهید خرازی اصفهان)

سید مهدی ابطحی، استادیار، دانشکدهٔ عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
محمد تمنایی*، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکدهٔ عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
شهاب‌الدین کرمانشاهی، دانشجوی دکتری، دانشکدهٔ عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران
E-mail:m_tamannaei@yahoo.com
دریافت: ۸۹/۰۷/۱۹- پذیرش: ۸۹/۱۰/۲۶

چکیده

این مطالعه، با هدف تحلیل ظرفیت مقاطع پایه بزرگراهی در ایران و ارتباط آن با نحوه رفتار رانندگان انجام شده‌است. بزرگراه مورد مطالعه در این تحقیق، بزرگراه درون‌شهری شهید خرازی اصفهان است. داده‌های ترافیکی جمع‌آوری شده در ساعات مختلف روز و شب شامل تردد، سرعت متوسط و سرفاصله زمانی هستند. با استفاده از مدلهای کلان سرعت- چگالی و همچنین با تحلیل سرفاصله‌های زمانی وسایل نقلیه، ظرفیت خطوط مختلف قطعه پایه بزرگراهی تحت شرایط جریان غیرمنقطع تعیین شده‌است. نتایج حاکی از آن است که ظرفیت خطوط مختلف بزرگراه مورد مطالعه بویژه خط سبقت بیشتر از ظرفیت پیشنهادی راهنمای ظرفیت راهها HCM *است. مهم‌ترین علت این امر، ویژگیهای متفاوت رفتاری جامعه مورد مطالعه رانندگان نسبت به سایر جوامع است. تمایل بخش عظیمی از جامعه رانندگان به انتخاب سرفاصله‌های غیرایمن و عدم رعایت فاصله ایمن دنباله‌روی بویژه در ترددهای نزدیک به ظرفیت، اگرچه ظرفیت خط را افزایش داده‌است ولی در عین حال سبب کاهش ایمنی و افزایش احتمال خطر تصادف نیز شده‌است. همچنین مشخص شد که نحوه رفتار رانندگان در خطوط مختلف بزرگراهی و نیز در ساعات شب و روز با یکدیگر متفاوت است. این مطالعه نشان داد که برای تحلیل ظرفیت بزرگراهها در ایران، اعمال تغییرات در مقادیر پیشنهادی توسط آیین‌نامه‌های کشورهای پیشرفته، رفتار صحیح‌تری از ترافیک را منعکس می‌سازد.*

واژه‌های کلیدی: ظرفیت، رفتار رانندگان، سرفاصله زمانی، دنباله‌روی

۱. مقدمه

ظرفیت، یکی از مهم‌ترین فاکتورهای تحلیل و طراحی تسهیلات حمل و نقلی محسوب می‌شود. راهنمای ظرفیت راهها[1](HCM)، ظرفیت تسهیلات را چنین بیان می‌کند: "حداکثر نرخ تردد ساعتی که بتوان انتظار داشت افراد یا وسایل نقلیه به نحوی معقول از یک نقطه یا قطعه یکنواختی از یک خط یا جاده، طی مدت زمان معین، تحت شرایط حاکم ترافیک، جاده و کنترل عبور داده شوند" [TRB, 2000]. اطلاع از ظرفیت، در کنار پیش‌بینی تقاضای آتی، به مهندسین ترافیک اجازه می‌دهد که طراحیها و برنامه‌ریزیهای تسهیلات جاده‌ای را به نحو مناسب انجام دهند. در صورتی که برآورد مهندسین از ظرفیت تسهیلات کمتر از مقدار واقعی باشد، طراحی بیشتر از حد نیاز خواهد بود که موجب اتلاف سرمایه‌ها و منابع می‌شود. از سوی دیگر، برآورد بیش از مقدار واقعی، سبب می‌شود که تسهیلات طراحی‌شده جوابگوی تقاضای ترافیک آتی نباشد[Wei and Sun, 2003].

نویسنده مسئول

www.SID.ir

Archive of SID

تـاکنون، مطالعـات زیـادی بـرای تحلیـل ظرفیـت بزرگراهـا و آزادراهها و نیز بررسی پارامترهای تأثیرگذار در تحلیل انجام شده است. راهنمای ظرفیت راهها – که به عنوان یکی از مراجع اصلی تحلیل ترافیک، در مقیاس وسیعی در سراسر دنیـا مـورد اسـتفاده قرار می‌گیرد– عوامل هندسی و ترافیکی همچون عـرض خـط و شانه، شیب، تعداد خطوط و سرعت آزاد را به عنـوان پارامترهـای مؤثر در ظرفیت تسهیلات جاده‌ای بیان کرده‌است[TRB, 2000]. راهنمای طراحـی تسـهیلات جـاده‌ای آلمـان (HBS) عـلاوه بـر عوامل فوق، شرایط نور و آب و هـوا را نیـز در تحلیـل ظرفیـت مؤثر می‌داند[FGSV, 2002]. اکسلیک نحـوه رفتـار رانـندگان را مهم‌ترین پارامتر تعیین‌کننده ظرفیت ذکر کـرده اسـت [Akcelik, 2008]. مطالعات انجـام‌گرفتـه در خصـوص ظرفیـت در برخـی کشورهای آسیایی نظیر چین و اندونزی و تایلنـد، بـه ایـن نکتـه اشاره داشته‌اند که تحلیل ظرفیت، بدون داشتن شناختی مبتنـی بـر رفتار رانندگان هر کشـور، منجـر بـه ارائـه نتـایجی غیرواقعـی و نامناسـب خواهـد شـد[Bang, 2000 and Nicholas, 1994]. رتواناسـین (۲۰۰۵) پـس از بررسـی برخـی بزرگراههـای شـهر بانکوک تایلند این گونه نتیجه گرفت که بـرای طراحـی و تحلیـل بزرگراههـای ایـن شـهر، اسـتفاده مسـتقیم از روابـط و نتـایج آیین‌نامه‌های کشـورهای غربـی نتـایج نامناسـبی در پـی خواهـد داشت، چرا که تسهیلات جاده‌ای بـا شـرایط هندسـی مشـابه، در کشورهای مختلف ممکن است دارای ظرفیتهـای متفـاوتی باشـند [Rotwanasin, 2003]. همچنـین دایسـوک (۱۹۹۹) بـا تحلیـل برخی از بزرگراههای ژاپن به این نتیجه رسید که وضعیت رفتاری رانندگان در خطوط مختلف یک بزرگراه نیز ممکن است متفاوت باشد [Daisuke (et al.), 1999].

در ایران مطالعاتی پیرامون تحلیـل ظرفیـت و نیـز بررسـی رفتـار رانندگان در مقاطع پایه آزادراهی انجـام شـده اسـت. وزیـری در بررسی روابط بین متغیرهای اصلی ترافیک برخی مـدلهای کـلان[۲] جریان ترافیک را مورد ارزیابی قرار داد. نتـایج حـاکی اسـت کـه رابطه سرعت– چگالی خطی گرینشـیلدز، مـدلی مناسـب جهـت تحلیـل ظرفیـت آزادراههـا در ایـران اسـت[Vaziri, 1995]. در مطالعه‌ای که توسط محمدی انجام شد، ارتباط بین پارامترهای کلان ترافیکی در حالات ویژه آزادراهی بررسی و ظرفیت خطوط در هـر حالـت محاسـبه گردیـد [محمـدی، ۱۳۷۸]. همچنـین سادات‌حسینی پس از جمع‌آوری اطلاعات خرد[۳] رفتاری رانندگان با استفاده از پـردازش تصـاویر، مـدلهایی جهـت توصـیف رفتـار حرکتـی وسـایل نقلیـه در مقطـع پایـه آزادراهـی ارائـه کـرد [سادات‌حسینی، ۱۳۸۷].

تاکنون مطالعه‌ای برای بررسی ظرفیت بزرگراههـای درون‌شـهری در ایران و ارتباط آن با نحوه رفتار رانندگان در فرآیند دنباله‌روی گزارش نشده است. از این روست که در بسیاری از مسائل مرتبط با طراحی و تحلیل ظرفیت بزرگراهها در شهرهای مختلف ایـران، نتایج مربوط به آیین‌نامه‌های خارجی بدون کوچک‌تـرین تغییـری بکار گرفته می‌شوند.

هدف از پژوهش حاضر، مقایسه مقادیر ظرفیت پیشنهادی توسـط راهنمـای ظرفیـت راههـا (HCM) بـا واقعیتهـای مربـوط بـه بزرگراههای درون‌شـهری در شـهرهای درحـال توسـعه همچـون اصفهان است. بزرگراه ٦ خطه شهید خرازی اصفهان جهت انجـام مطالعه موردی در این پژوهش انتخاب شد. با استفاده از داده‌هـای کلان و خرد ترافیکی، ظرفیت خطـوط بزرگراهـی تحـت شـرایط جریان غیرمنقطع[٤] محاسبه و با مقـدار ظرفیـت پیشـنهادی HCM مقایسه شد. داده‌ها در ساعات مختلف روز و شب از یـک مقطـع پایه جمع‌آوری شدند. اطلاعات کلان شامل نرخ تـردد و سـرعت متوسط مکانی و اطلاعات خرد شامل سرفاصله‌های زمانی وسایل نقلیه هستند. همچنین، با استفاده از تحلیل سرفاصله‌هـای وسـایل نقلیه دنباله‌رو، رفتار رانندگان و میزان خطرپذیری آنان در فرآینـد دنباله‌روی (به عنوان یکی از عوامل مؤثر بر ظرفیت) مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲. نگاهی اجمالی به مبانی پژوهش

۲-۱ ظرفیت و مدلهای کلان ترافیک

با استفاده از تحلیل کلان[۳] جریان ترافیک، می‌تـوان الگوریتمهـایی را برای مشخص کردن رابطه جریـان تـردد بـا پارامترهـایی نظیـر سرعت و چگالی ایجـاد کـرد [Nicholas and Lester, 2010]. در این نوع تحلیل، متغیرهای تجمعی ترافیک نظیر تردد، سـرعت متوسط سفر و چگالی مورد بررسی قرار می‌گیرند.

رابطـه اساسـی جریـان ترافیـک عبارتسـت از برابـری تـردد بـا حاصلضرب چگالی و سرعت:

$$Q = V.D \qquad (۱)$$

www.SID.ir

Archive of SID

که در آن Q، نرخ تردد بر حسب وسیله نقلیه برساعت، D، چگالی برحسب وسیله نقلیه برکیلومتر و V، سرعت متوسط مکانی بر حسب کیلومتر بر ساعت است. اکثر تحلیلگران به منظور بررسی کلان جریان ترافیک بر رابطه سرعت- چگالی تمرکز می‌کنند. این امر به این دلیل است که رفتار راننده تابع چگالی است و نه نرخ تردد[Roess, 2004]؛ زیرا چگالی وسایل نقلیه و فاصله مکانی وسایل از یکدیگر، پارامتری قابل درک برای رانندگان است که سرعت حرکت خود را براساس آن تنظیم می‌کنند. در حالی‌که راننده درک دقیقی از نرخ تردد وسایل نقلیه (تعداد وسایل عبوری از یک مقطع) ندارد. تاکنون مدلهای کلان سرعت- چگالی متفاوتی ارائه شده‌اند که از جمله آنها می‌توان به مدل خطی گرینشیلدز (معادله ۲)، مدل لگاریتمی گرینبرگ (معادله ۳) و مدل نمایی آندروود (معادله ٤) اشاره کرد. [Roess, 2004]:

$$V = V_f(1 - D/D_j) \qquad (۲)$$

$$V = V_m \times Ln(D_j / D) \qquad (۳)$$

$$V = V_f \times \exp(-D/D_m) \qquad (٤)$$

که در آنها V_f و D_j به ترتیب برابر سرعت آزاد جریان و چگالی راهبندان و V_m و D_m بیانگر سرعت و چگالی متناظر با ظرفیت هستند. با بکارگیری معادله اساسی ترافیک و مشتق‌گیری از معادله بر حسب D، بیشینه تردد (ظرفیت) به دست می‌آید. به عنوان مثال در مدل گرینشیلدز:

$$\begin{aligned} &Q = V.D = V_f.D.(1 - D/D_j) \\ &\frac{dQ}{dD} = V_f - 2.V_f.\frac{D}{D_j} = 0 \to D_0 = \frac{D_j}{2} \to \\ &Q_{\max} = V_f.\frac{D_j}{2}.(1 - \frac{D_j}{2.D_j}) = \frac{V_f.D_j}{4} \end{aligned} \qquad (۵)$$

۲-۲ ظرفیت و سرفاصله زمانی وسایل نقلیه

سرفاصله زمانی وسایل نقلیه یکی از پارامترهای خرد جریان ترافیک است که بر ظرفیت، سطح سرویس و ایمنی راه تأثیرگذار است[Thamizh, A., 2003]. توزیع سرفاصله‌های مطلوب جامعه رانندگان – سرفاصله‌ای که در آن، راننده از احساسی ایمن در دنباله‌روی برخوردار است- تأثیری مستقیم بر ظرفیت تسهیلات جاده‌ای دارد. به گونه‌ای که هرچه میانگین سرفاصله‌های مطلوب رانندگان کمتر باشد، تعداد وسایل نقلیه قابل عبور (ظرفیت جاده) بیشتر خواهد بود. رابطه بین ظرفیت یک خط از بزرگراه و سرفاصله زمانی وسایل نقلیه عبارتست از:

$$C = \frac{3600}{\overline{h}} \qquad (٦)$$

که در آن C بیانگر ظرفیت (برحسب pc/h/ln) و $\overline{h}$ نمایانگر سرفاصله‌ی متناظر با ظرفیت (برحسب ثانیه) است. در مطالعات وزارت راه و ترابری، سرفاصله متناظر با ظرفیت برابر با متوسط سرفاصله زمانی وسایل نقلیه دنباله رو در نظرگرفته شده است[شهپر، الف. (وهمکاران)، ۱۳۸٤]. وسایل دنباله‌رو بخشی از وسایل نقلیه هستند که تحت تأثیر وسیله نقلیه جلوی خود قرار دارند[Sadeghhosseini, 2002]. جهت تشخیص وسایل دنباله‌رو، واسیلوسکی پیشنهاد کرد وسایل نقلیه‌ای که سرفاصله مشاهده شده آنها کمتر از ۳/۵ ثانیه است به عنوان وسایل نقلیه دنباله‌رو به حساب آیند[Wasielewski, 1979].

۲-۳ ظرفیت پیشنهادی راهنمای ظرفیت راهها HCM

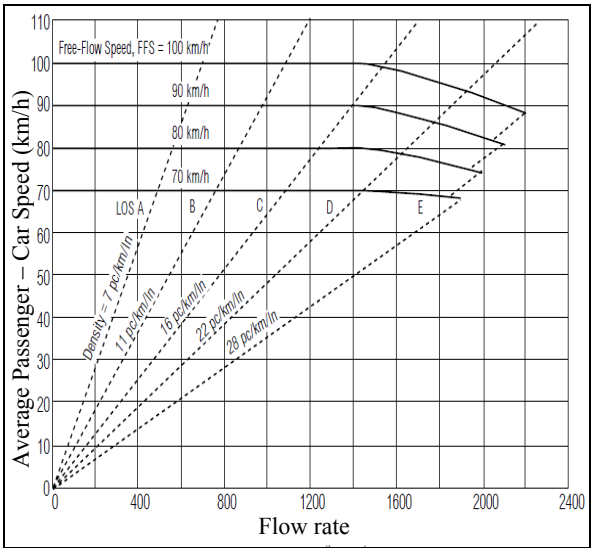
در راهنمای ظرفیت راهها، سرعت آزاد جریان به عنوان مبنای تحلیل ظرفیت در نظر گرفته شده‌است. شکل ۱ نمودارهای سرعت- تردد ارائه شده توسط HCM برای بزرگراههای چندخطه با سرعتهای آزاد متفاوت را نشان می‌دهد. همان گونه که در این شکل ملاحظه می‌شود، HCM ظرفیت (حداکثر نرخ تردد قابل عبور در سطح سرویس E) یک خط از بزرگراههای چندخطه با سرعتهای آزاد ۷۰، ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ کیلومتربرساعت را به ترتیب برابر با ۱۹۰۰، ۲۰۰۰، ۲۱۰۰ و ۲۲۰۰ pc/h/ln پیشنهاد می‌کند. همچنین یکی از پیش‌فرضهای مهم در متدولوژی تحلیل ظرفیت ارائه شده توسط HCM، جریان ترافیک متجانس در همه خطوط است که بر اساس آن، کل جریان ترافیک به طور یکسان در بین خطوط توزیع می‌شود. به همین جهت، ظرفیت خطوط مختلف بزرگراه با یکدیگر برابر در نظر گرفته می‌شود. این فرض، با توجه به نحوه رفتار رانندگان جامعه مورد مطالعه HCM قابل توجیه است.

بر اساس مشاهدات میدانی انجام شده در نرخ ترددهای کم، سرعت آزاد جریان بزرگراه مورد مطالعه برابر با ۸۰/۸ (تقریباً ۸۰) کیلومتربرساعت است. در نتیجه، ظرفیت پیشنهادی HCM برای

www.SID.ir

Archive of SID

هر خط از این بزرگراه برابر با pc/h/ln ۲۰۰۰ است. لازم به ذکر است که در این بزرگراه، حداکثر سرعت مجاز تابلو برابر ۷۰ کیلومتربرساعت است.



شکل ۱. منحنی‌های سرعت- تردد HCM مربوط به بزرگراه‌های چندخطه [TRB, 2000]

۳. گردآوری اطلاعات

عملیات آماربرداری در آذرماه ۱۳۸۸ با فیلمبرداری از طول ۹۰ متر از یک مقطع در بزرگراه شش‌خطه شهید خرازی اصفهان انجام شد. آمار جمع‌آوری شده مربوط به یک روز عادی هفته با شرایط آب و هوایی معمولی بود. مقطع فیلمبرداری شده، شامل ۳ خط برای عبور وسایل نقلیه تحت شرایط جریان غیرمنقطع[۴] است. فاصله مقطع آماربرداری از شیبراهه خروجی بالادست ۸۰۰ متر و از شیبراهه ورودی پایین‌دست برابر با ۵۰۰ متر است. حداقل فاصله یک مقطع پایه از شیبراهه خروجی در بالادست (و یا شیبراهه ورودی در پایین دست) ۵۰۰ فوت (حدود ۱۵۰ متر) ذکر شده‌است[Roess, 2004]. در نتیجه، مقطع مورد تحلیل، یک مقطع پایه محسوب می‌شود و می‌توان از تأثیر جریان ترافیک شیبراهه‌ها بر ترافیک عبوری از مقطع صرف‌نظر کرد. میزان تردد وسایل نقلیه در خط راست (خط ۱) به مراتب کمتر از این میزان در خطوط دیگر است. همچنین درصد زیادی از وسایل نقلیه غیرسواری تمایل دارند در خط ۱ حرکت کنند. در نتیجه، الگوی ترافیکی خط ۱ تفاوت زیادی با سایر خطوط دارد. به همین جهت در این مطالعه، داده‌های مربوط به این خط حذف شدند.

۳-۱ اطلاعات کلان جریان

مجموعاً ٦ ساعت از جریان ترافیک (شامل ۳ ساعت مربوط به روز و ۳ ساعت مربوط به شب) فیلمبرداری شد. به منظور تشخیص دقیق لحظه عبور وسایل نقلیه از خط سبقت (خط ۳) و خط میانی (خط ۲)، سه شاخص در فواصل ٤٥ متری بر روی دیوار کناری بزرگراه نصب شدند. تعداد وسایل نقلیه عبوری از هر خط به تفکیک نوع وسیله شمارش شد. به منظور محاسبه سرعت متوسط مکانی وسایل نقلیه، در هر دقیقه تعداد شش نمونه وسیله نقلیه عبوری از هر خط به طور تصادفی انتخاب و زمان طی‌شده برای عبور هر وسیله از طول قطعه پایه، با دقت ۱:۳۰ ثانیه محاسبه شد. به این ترتیب، اطلاعات تردد و سرعت متوسط مکانی مربوط به وسایل نقلیه عبوری در ساعات فیلمبرداری شده به تفکیک خطوط ۳ و ۲ استخراج و با استفاده از نرم‌افزار Excel ثبت شد. در این مطالعه، بازه زمانی تحلیل برابر با ۵ دقیقه انتخاب شد. مطالعات گذشته، بازه‌های زمانی ۵ تا ۱۵ دقیقه‌ای را برای تحلیل داده‌های ترافیکی مورد استفاده قرار داده‌اند[Vaziri, 1995 and Hall, 1993].

بازه‌های ۵ دقیقه‌ای از آن جهت انتخاب شده‌اند که سرفاصله‌های واقع در یک بازه ۵ دقیقه‌ای، نسبت به بازه‌های بزرگ‌تر، همگونی نسبتاً بیشتری از خود نشان می‌دهند؛ به نحوی که در بازه‌های ۵ دقیقه‌ای، میزان تأثیرپذیری سرفاصله‌ها از مقدار تردد عبوری واضح‌تر نشان داده می‌شود. در مجموع، اطلاعات ترافیکی مربوط به ۷۲ بازه زمانی ۵ دقیقه‌ای به تفکیک خط عبوری استخراج شد. برای تبدیل حجم ترافیک مختلط به حجم معادل سواری، از ضرایب همسنگ سواری پیشنهادی HCM (فصل ۲۱، صفحه ۱۰) استفاده شد. مجموعاً بیش از ۹۷٪ وسایل نقلیه عبوری از خط سبقت، وسیله نقلیه سواری هستند. در حالی که این مقدار برای خط میانی حدود ۹۲٪ است. با اعمال ضرایب همسنگ سواری، نرخ تردد بر حسب تعداد وسیله نقلیه معادل سواری بر ساعت برخط (pc/h/ln) بیان می‌شود. همچنین با استفاده از معادله اساسی ترافیک (معادله ۱)، پارامتر چگالی نیز محاسبه شد. در جدول ۱ برخی ویژگی

های آماری جریان ترافیک استخراج‌شده در رژیم زیراشباع و فوق‌اشباع ارائه شده‌اند. گفتنی است در اکثر بازه‌های زمانی تحلیل، رژیم جریان زیراشباع بر ترافیک حاکم بوده‌است.

www.SID.ir

Archive of SID

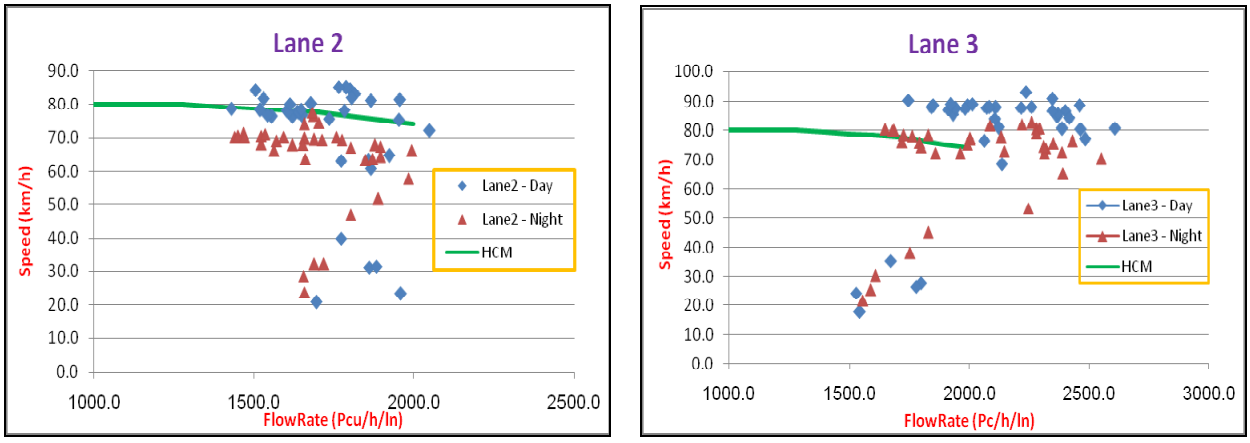
در بسیاری از بازه‌های زمانی، علیرغم رژیم جریان زیراشباع، میزان نرخ تردد عبوری از خط سبقت از ظرفیت پیشنهادی راهنمای ظرفیت راهها (HCM) بیشتر است. این راهنما، ظرفیت یک خط از بزرگراه چندخطه با سرعت آزاد ۸۰ کیلومتربرساعت را برابر با ۲۰۰۰ Pc/h/ln ذکر کرده‌است. شکل ۲ نمودار سرعت- تردد مربوط به داده‌های گردآوری شده از خط سبقت و میانی در ساعات روز و شب و همچنین نمودار مربوط به HCM را نمایش می‌دهد. ملاحظه می‌شود که در شرایط مشابه نرخ تردد، معمولاً وسایل نقلیه در ساعات روز سرعت بیشتری نسبت به ساعات شب اختیار می‌کنند.

۳-۲ اطلاعات سرفاصله‌های زمانی

در این مطالعه، همچنین به منظور محاسبه ظرفیت با استفاده از آنالیز خرد جریان ترافیک، سرفاصله‌های زمانی وسایل نقلیه عبوری به تفکیک خطوط ۳ و ۲ استخراج و مورد تحلیل قرار گرفتند. ٤ بازه ٤٥ دقیقه‌ای (شامل ۱/۵ ساعت روز و ۱/۵ ساعت از شب) جهت استخراج داده‌ها انتخاب شدند. در طول بازه‌های زمانی مذکور، علیرغم نرخ تردد بالای ترافیک، رژیم جریان در حالت زیراشباع قرار داشت. لحظه عبور هریک از وسایل نقلیه مربوط به این بازه‌های زمانی، از شاخص نصب شده در کنار بزرگراه با استفاده از نرم‌افزار Uleadvideostudio11 با دقت ۱:۳۰ ثانیه ثبت شد. اطلاعات در نرم‌افزار Excel وارد و سرفاصله زمانی هریک از وسایل نقلیه محاسبه شد. در مجموع ۱۰۵۵۳ سرفاصله زمانی در ساعات مختلف روز و شب به دست آمد. جهت تشخیص وسایل نقلیه دنباله‌رو، سرفاصله‌های کمتر از ۳/۵ ثانیه تفکیک شدند.

جدول ۱. خصوصیات آماری جریان ترافیک

رژیم جریان	جریان زیر اشباع				جریان فوق اشباع			
شرایط	خط سبقت		خط میانی		خط سبقت		خط میانی	
	صبح	شب	صبح	شب	صبح	شب	صبح	شب
بیشینه نرخ تردد (pc/h/ln)	۲٦٦٦	۲٤٥۲	۲۱۰۰	۱۹۳۸	۲۱٦٤	۲۳۸۰	۱۹٦۰	۱۸۹۰
کمینه نرخ تردد (pc/h/ln)	۱٦۸٤	۱٤۲۰	۱۳۵۰	۱۳۲۰	۱۵۰٤	۱۳۲۸	۱٦۹٦	۱٤۲۲
درصد وسایل نقلیه سواری	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۱	۰/۹٤	۰/۹۷	۰/۹۸	۰/۹۰	۰/۹۲
کمینه سرعت (km/hr)	٦۸/۳	٤۵/۱	۵۱/٦	٤۷/۰	۱۷/۳	۱۵/۳	۱۹/۳	۲۰/۰
بیشینه چگالی (pc/km/ln)	۳۳/۹	٤۰/۵	۳٦/۷	۳۸/۳	۸۸/۱	۸٦/۸	۸۹/۷	۷۳/۱



الف. خط سبقت (خط۳)　　ب. خط میانی (خط۲)

شکل ۲. نمودار سرعت- نرخ تردد مربوط به خطوط بزرگراه

www.SID.ir

Archive of SID

٤. نتایج و بحث

در این بخش نتایج حاصل از محاسبه ظرفیت با استفاده از تحلیل کلان و خرد جریان ترافیک ارائه شده است.

٤-١ نتایج تحلیل کلان جریان

سه مدل کلان جریان ترافیک شامل مدل خطی گرینشیلدز، مدل لگاریتمی گرینبرگ و مدل نمایی آندروود بر داده‌های سرعت- چگالی برازش داده‌شدند. با استفاده از نرم‌افزار SPSS تحلیل آماری انجام گردید. به منظور تعیین همبستگی مدل‌ها از پارامتر R^2 و به منظور تعیین معناداری ضرایب مدلها از آزمون آماری t استفاده شد. در جدول ۲، مدلهای مختلف کلان، نتایج آزمونهای آماری و نیز ظرفیت حاصل از هر مدل، به تفکیک خطوط ۳ و ۲ نمایش داده شده‌اند.

ملاحظه می‌شود که در همه مدلهای برآورد شده، مقادیر بالای آماره‌ی t نشان دهنده معنادار بودن ضرایب مدل هستند. مقادیر آماره F نیز، به حد کافی بزرگ‌اند، به گونه‌ای که فرضیه معنادارنبودن مدل رد می‌شود. همچنین بالا بودن ضرایب همبستگی (R^2)، مشخص‌کننده آن است که مدل‌ها برازش مناسبی با داده‌ها دارند. در نتیجه همه مدل‌های آماری ارائه شده، مناسب ارزیابی می‌شوند. بیشترین مقادیر ظرفیت تخمین‌زده شده، مربوط به مدل خطی گرینشیلدز و کمترین مقادیر، مربوط به مدل نمایی آندروود است. ملاحظه می‌شود که ظرفیت به‌دست آمده با استفاده از مدلهای کلان ترافیک بیشتر از مقدار ظرفیت پیشنهادی HCM (برابر با ۲۰۰۰pc/h/ln) است.

٤-٢ نتایج تحلیل خرد جریان با استفاده از سرفاصله‌های زمانی

ویژگیهای آماری سرفاصله‌های وسایل نقلیه دنباله‌رو در جدول ۳ ذکر شده‌است.

همان‌گونه که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، میانگین سرفاصله‌های زمانی وسایل نقلیه دنباله‌رو (سرفاصله‌های کمتر از ۳.۵ ثانیه) در خط سبقت در ساعات روز برابر ۱/۳٤ ثانیه به دست آمده است. در نتیجه مطابق با معادله ۵، ظرفیت این خط برابر با pc/h/ln ۲۵۹۰ خواهد بود. این مقدار اختلاف کمی با مقدار ظرفیت حاصل از مدل خطی گرینشیلدز (pc/h/ln ۲۵۵٦) دارد، در حالی که میانگین سرفاصله‌های زمانی وسایل نقلیه دنباله‌رو در ساعات روز خط میانی برابر ۱/٦۹ ثانیه به دست آمده است که معادل با ظرفیت pc/h/ln ۲۱۳۰ است.

همچنین با توجه به بالاتر بودن میانگین سرفاصله‌ها در ساعات شب، نتیجه می‌شود که ظرفیت خطوط بزرگراهی در ساعات شب، نسبت به ساعات روز کاهش می‌یابد. این کاهش ظرفیت از ۲ تا ۸ درصد است.

جدول ۲. ظرفیت حاصل از مدلهای کلان ترافیک در شرایط مختلف

شرایط		مدل	فرمول	F	R^2	ظرفیت Pc/h/ln
خط سبقت (خط ۳)	ساعات روز	آندروود	V = 176.2537×exp[-0.0289×D] {t=59.9} {t=-57.1}	۳۲٥٦	۰/۹٤۸۱	۲۲٤٤
		گرینشیلدز	V = -1.4533×D + 121.9052 {t=-45.6} {t=115.9}	۲۰۷٥	۰/۹۲۱۰	۲٥٥٦
		گرینبرگ	V = -57.8884×ln(D) + 271.6015 {t=-41.2} {t=57.4}	۱٦۹٤	۰/۹۰٤۹	۲۳۲۲
خط میانی (خط ۲)	ساعات روز	آندروود	V = 126.8624×exp[-0.0226×D] {t=104.6} {t=-74.3}	٥٥۱۸	۰/۹٦۸۸	۲۰٦٥
		گرینشیلدز	V = -1.0859×D + 101.1735 {t=-43.1} {t=127.4}	۱۸٥٤	۰/۹۱۲٤	۲۳٥۷
		گرینبرگ	V = -43.9376×ln(D) + 213.1270 {t=-54.1} {t=80.7}	۲۹۳۰	۰/۹٤۲۸	۲۰٦٦

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۳. خصوصیات آماری سرفاصله‌های زمانی وسایل نقلیه دنباله‌رو

شرایط	خط سبقت (خط ۳)		خط میانی (خط ۲)	
	صبح	شب	صبح	شب
تعداد نمونه آماری	۲۷۹۳	۲۵۸۳	۱۹۸۲	۱۹٤٥
میانگین سرفاصله‌ها (ثانیه)	۱/۳۹	۱/٥۰	۱/٦۹	۱/۷۳
انحراف معیار سرفاصله‌ها (ثانیه)	۰/۷۲	۰/۷۲	۰/۸۰	۰/۷۷
میانه سرفاصله‌ها (ثانیه)	۱/۲۲	۱/۳۳	۱/٥۳	۱/٦۲
سرفاصله‌های کمتر از ۲ ثانیه (٪)	۸۰/٤۹	۷٦/٤۲	٦٥/٤۹	٦٤/٥۸
سرفاصله‌های کمتر از ۱.۸ ثانیه (٪)	۷٥/۱٥	۷۰/۷۳	٥۹/۷۹	٥۷/۸٤
سرفاصله‌های کمتر از ۱ ثانیه (٪)	۳٥/٤۸	۲۷/۰۲	۲۲/۲۰	۱۸/٤٦

٤-۳ استنتاجات

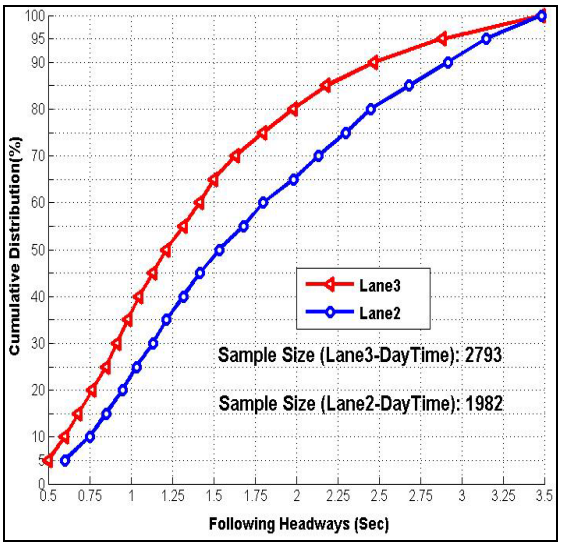
ملاحظه می‌شود که ظرفیت محاسبه شده مربوط به خطوط بزرگراه مورد مطالعه (به ویژه خط سبقت) از مقدار ظرفیت پیشنهادی راهنمای ظرفیت راهها (HCM) بیشتر است. این امر نشانه متفاوت بودن ویژگیهای رفتاری جامعه مورد مطالعه رانندگان با جامعه رانندگان مورد نظر HCM است. به نظر می‌رسد تمایل درصد بالایی از رانندگان به انتخاب سرفاصله‌های غیرایمن مخصوصاً در نرخ ترددهای زیاد سبب کاهش میانگین سرفاصله‌های دنباله‌رو و افزایش ظرفیت شده است.

برای برآورد سرفاصله زمانی ایمن در فرآیند دنباله‌روی، قوانینی مطرح شده‌اند که از آن جمله می‌توان به قانون ۲ ثانیه[٥] و قانون نصف سرعت[٦] اشاره کرد. مطابق با قانون ۲ ثانیه که در آمریکا مورد استفاده قرار می‌گیرد، وسیله نقلیه دنباله‌رو در هر سرعتی، ملزم به حفظ حداقل فاصله معادل ۲ ثانیه از وسیله نقلیه پیشرو است. در برخی کشورهای اروپایی نظیر آلمان، قانون نصف سرعت استفاده می‌شوند، به صورتی که طول فاصله ایمن (برحسب متر) برابر با نصف عدد سرعت وسیله نقلیه (برحسب کیلومتر بر ساعت) دنباله‌رو است و یا به عبارت دیگر، وسیله نقلیه دنباله‌رو، ملزم به حفظ فاصله ایمن معادل ۱/۸ ثانیه از وسیله نقلیه پیشرو است[Fiorani, 2005]. با نگاهی به آمار ارائه شده در جدول ۳ مشخص می‌شود که درصد بسیار بالایی از رانندگان در حین فرآیند دنباله‌روی، هیچ یک از قوانین مذکور را رعایت نمی‌کنند. به عنوان نمونه، در ساعات روز به ترتیب ۷٥٪ و ٦۰٪ رانندگان عبوری از خطوط سبقت و میانی، قانون نصف سرعت را رعایت نکرده‌اند. همچنین ملاحظه می‌شود که درصد قابل توجهی از وسایل نقلیه دنباله‌رو در خط ۳ (۳٥/٥ ٪) سرفاصله‌ای کمتر از ۱ ثانیه داشته‌اند که این امر نشانگر رفتار ریسک‌پذیر بخش عظیمی از جامعه رانندگان است، چرا که به نظر می‌رسد برای این بخش از رانندگان، سرفاصله‌های کم در دنباله‌روی، سرفاصله‌های مطلوبی هستند و راننده علیرغم سرعت زیاد و سرفاصله کم، با احساسی ایمن به دنباله‌روی ادامه می‌دهد. این امر اگرچه ظرفیت خطوط را افزایش داده است ولی در عین حال سبب کاهش ایمنی و افزایش احتمال خطر تصادف نیز شده است. یکی از فرضیات اصلی HCM در تحلیل ظرفیت آزادراهها و بزرگراهها، فرض استفاده همگن و یکسان وسایل نقلیه از خطوط مختلف است. بر این اساس جریان ترافیک بایستی به طور یکنواخت در خطوط مختلف جاده توزیع شود. این فرض، با توجه به نحوه رفتار رانندگان جامعه مورد مطالعه HCM قابل توجیه است. در بزرگراه مورد مطالعه این تحقیق، فرض مذکور تحت هیچ شرایطی (حتی شرایط ترافیک سنگین در رژیم جریان زیراشباع) صادق نبود. به نظر می‌رسد رفتار جامعه رانندگان مورد مطالعه جهت انتخاب سرفاصله در فرآیند دنباله‌روی وسایل نقلیه، در خطوط مختلف بزرگراهی با یکدیگر متفاوت است و همین امر سبب شده که پارامترهایی چون ظرفیت و ایمنی، در خطوط مختلف تفاوتهای قابل ملاحظه‌ای با یکدیگر داشته باشند. در شکل ۳ صدک‌های گوناگون سرفاصله‌های وسایل نقلیه دنباله‌رو

www.SID.ir

Archive of SID

در خط سبقت (خط ۳) و میانی (خط ۲) با یکدیگر مقایسه شده‌اند. ملاحظه می‌شود که در همه صدک‌ها، مقدار مربوط به خط سبقت از مقدار متناظر مربوط به خط میانی کمتر است. دنباله‌روی وسایل نقلیه با سرفاصله‌های کوتاه در خط سبقت، بیانگر ریسک‌پذیری بالاتر رانندگان در این خط نسبت به رانندگان خط میانی است، مسئله‌ای که باعث شده خط سبقت ظرفیت بیشتری نسبت به خط میانی داشته باشد.



شکل ۳. مقایسه صدک‌های سرفاصله‌های وسایل نقلیه دنباله‌رو در خطوط سبقت و میانی

۵. جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و پیشنهادات

این مطالعه، با هدف تحلیل ظرفیت مقاطع پایه بزرگراهی در ایران و ارتباط آن با نحوه رفتار رانندگان انجام شده است. بزرگراه مورد مطالعه در این تحقیق، بزرگراه درون‌شهری شهید خرازی اصفهان است. داده‌های ترافیکی جمع‌آوری شده در ساعات مختلف روز و شب شامل تردد، سرعت متوسط و سرفاصله زمانی هستند. با استفاده از مدلهای کلان سرعت- چگالی شامل: مدل خطی گرینشیلدز، مدل لگاریتمی گرینبرگ و مدل نمایی آندروود، ظرفیت خطوط سبقت و میانی قطعه پایه مورد مطالعه تعیین شد.

همچنین، در بخش تحلیل خرد جریان، ظرفیت با استفاده از سرفاصله‌های وسایل نقلیه دنباله‌رو محاسبه شد. مقادیر به‌دست‌آمده با مقدار ظرفیت پیشنهادی راهنمای ظرفیت راهها HCM مقایسه شد. در جدول ٤ خلاصه نتایج ظرفیت حاصل از روشهای مختلف ارائه شده است. نتایج، مربوط به ساعات روز است.

جدول ٤. خلاصه نتایج ظرفیت حاصل از روش‌های مختلف

روش محاسبه ظرفیت	ظرفیت (Pc/h/ln)	
	خط سبقت (خط ۳)	**خط میانی (خط ۲)**
مدل نمایی آندروود	۲۲٤٤	۲۰٦٥
مدل خطی گرینشیلدز	۲۵۵٦	۲۳۵۷
مدل لگاریتمی گرینبرگ	۲۳۲۲	۲۰٦٦
سرفاصله‌های‌وسایل‌نقلیه دنباله‌رو	۲۵۹۰	۲۱۳۰
راهنمای ظرفیت راهها HCM	۲۰۰۰	۲۰۰۰

بر این مبنا، نتایج این تحقیق در زیر ارائه می‌شود:

۱- با مقایسه ظرفیت محاسبه شده از روشهای مختلف مشخص می‌شود که ظرفیت خطوط بزرگراه مورد مطالعه (به ویژه خط سبقت) بیشتر از ظرفیت پیشنهادی راهنمای ظرفیت راهها (HCM) است. این امر نشانگر متفاوت بودن ویژگیهای رفتاری جامعه رانندگان مورد مطالعه با جامعه رانندگان موردنظر HCM است. به نظر می‌رسد تمایل درصد بالایی از رانندگان به انتخاب سرفاصله‌های غیرایمن و عدم رعایت فاصله ایمن دنباله‌روی بویژه در نرخ ترددهای زیاد، سبب کاهش میانگین سرفاصله‌های دنباله‌رو و افزایش ظرفیت شده است.

به عنوان مثال در خط سبقت، بیش از ۸۰ ٪ وسایل نقلیه دنباله‌رو سرفاصله‌ای کمتر از ۲ ثانیه و بیش از ۳۵ ٪، سرفاصله‌ای کمتر از ۱ ثانیه انتخاب کرده‌اند. رفتار ریسک‌پذیر بخش عظیمی از جامعه رانندگان به‌گونه‌ای است که راننده با وجود سرعت زیاد و سرفاصله کم، همچنان با احساسی ایمن به دنباله‌روی ادامه می‌دهد. این امر اگرچه ظرفیت خطوط را افزایش داده است، ولی در عین حال سبب کاهش ایمنی و افزایش احتمال خطر تصادف نیز شده است. آمار نشان می‌دهد که بیش از ۷۰ درصد تصادفات و به وقوع پیوسته در بزرگراه شهید خرازی، از دسته تصادفات «جلو به عقب» هستند. همچنین علت اصلی در بیش از ۷۰ درصد تصادفات، «عدم رعایت فاصله طولی» و «عدم توجه به جلو»

www.SID.ir

Archive of SID

ذکر شده است. این عوامل عمدتاً ناشی از انتخاب سرفاصله‌های بسیار کوتاه در دنباله‌روی هستند [ابطحی، ۱۳۸۹].

۲- علاوه بر تفاوت رفتار جامعه رانندگان مورد مطالعه با سایر جوامع، نحوه رفتار رانندگان در خطوط مختلف بزرگراهی نیز با یکدیگر متفاوت است. همین امر سبب شده که پارامترهایی چون ظرفیت و ایمنی، در خطوط مختلف تفاوتهای قابل ملاحظه‌ای با یکدیگر داشته باشند. ریسک‌پذیری بیشتر رانندگان خط سبقت نسبت به رانندگان خط میانی باعث شده که خط سبقت ظرفیت بیشتری نسبت به خط میانی داشته باشد.

۳- با مشاهده آمار کلان و خرد ترافیک در ساعات مختلف شب و روز مشخص می‌شود که ظرفیت مقطع پایه بزرگراهی در ساعات شب، حدود ۲ تا ۸ درصد کمتر از مقدار متناظر در ساعات روز بوده است. این مسئله به دلیل آن است که اکثر رانندگان در ساعات شب با احتیاط بیشتری از روز رانندگی می‌کنند.

نتایج حاصل از این تحقیق، قابل تعمیم به شرایط مختلف بزرگراههای کشور ایران است. جهت استنباط دقیق و جامع نسبت به رفتار رانندگان در شهرهای مختلف ایران و مقایسه آنها با یکدیگر و نیز با نتایج حاصل از سایر کشورها، پیشنهاد می‌شود بزرگراههای درون‌شهری و برون‌شهری با شرایط هندسی و ترافیکی نسبتاً مشابه انتخاب شوند و با استفاده از روشهای کلان و خرد ترافیک، ظرفیت مقاطع پایه بزرگراهی به صورت مقایسه‌ای تحلیل گردند. پیشنهاد می‌شود میزان تأثیر عواملی از قبیل نور (روز یا شب بودن) و آب و هوا در مناطق مختلف کشور بر ظرفیت بزرگراهها مورد مطالعه قرار گیرد.

همچنین پژوهشهایی پیرامون امکان‌سنجی استفاده از نتایج حاصل از آیین‌نامه‌هایی همچون HCM برای طراحی و تحلیل آزادراهها، راههای دوخطه و خیابانهای شهری در ایران بایستی مورد توجه پژوهشگران قرار گیرد.

٦. سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از شهرداری اصفهان به سبب همکاری در انجام این تحقیق، سپاسگزاری می‌کنند.

۷. پی‌نوشت‌ها

1. Highway Capacity Manual
2. Macroscopic
3. Microscopic
4. Uninterrupted flow conditions
5. The two-second rule
6. The half-speedometer rule

۸. مراجع

- ابطحی، م.، تمنایی، م.، حجازی، ا.، کرمی، ع. و ابریشمکار، ع. (۱۳۸۹) "تحلیل ایمنی وسایل نقلیه در فرآیند دنباله‌روی، مطالعه موردی: بزرگراه درون‌شهری شهید خرازی اصفهان"، دهمین کنفرانس بین‌المللی حمل‌ونقل و ترافیک، تهران.

- محمدی، م. (۱۳۷۸) "تحلیل ظرفیت و بررسی عملکرد ترافیک در حالات ویژه آزادراهها"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شریف.

- سادات‌حسینی، م. (۱۳۷۸) "بررسی رفتار حرکتی وسایل نقلیه در قسمت اصلی آزادراه با استفاده از پردازش تصاویر"، پایان‌نامه برای دریافت درجه دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف.

- شهپر، الف، نوروزی، ر.، فرخی سعدآبادی، ک.، ایزدپناه، پ. و سیادت‌موسوی، م. (۱۳۸٤) "مطالعات اولیه (امکان‌سنجی) تحلیل ظرفیت، همسنگ سواری و سرعت متوسط در انواع مختلف راههای برون‌شهری"، سازمان راهداری و حمل و نقل جاده‌ای وزارت راه و ترابری، شهریور ۱۳۸٤.

- Akcelik, R. (2008) "The relationship between capacity and driver behavior", TRB National Roundabout Conference, Kansas City, U.S.A.

- Bang, K.L. (2000) "Development of capacity guidelines for road links and intersections for Henan and Hebei Provinces, PRC", in Proceeding of 4th International Symposium on Highway Capacity, pp. 287-298.

- Daisuke, S., Izumi, O. and Fumihiko, N. (1999) "On estimation of vehicular time headway distribution parameters", Journal of Traffic Engineering, Japan, Code: S0340A, Vol.34; No.6; pp.18-27.

www.SID.ir

Archive of SID

"Transferability of HCM to Asian Countries: An exploratory evidence from Bangkok's multilane highways", Proceedings of the 3rd International SIIV Congress, September.

- Sadeghhosseini, S. (2002) "Time headway and platooning characteristics of vehicles on interstate highways", Ph.D. Thesis, University of Illinois, USA.

- Thamizh, Arasan (2003) "Headway distribution of heterogeneous traffic on urban arterials", Journal of Institute of Engineering (India), Vol. 84, November.

- TRB (2000) "Highway capacity manual", Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., U.S.A.

-- Vaziri, M. (1995) "Traffic flow characteristics for Iranian freeways", Proceedings of Second International Conference on Roads and Road Transport Problems, ICORT-95, New Delhi, India.

- Wasielewski, P. (1979) "Car- following headways on freeways interpreted by the semi- Poisson headway distribution model", Transportation Science, Volume 13, Number 1, pp. 36-55.

- Wei, Z. and Sun, X. (2003) "Capacity analysis based on theoretical and practical considerations", Transportation Research Record, Journal of Transportation Research Board, No. 1846, p. 50-55.

- Fiorani, M., Mariani, M., Tango, F. and Saroldi, A. (2005) "Saspence - Safe speed and safe distance: Project overview and customer benefit analysis of a novel driver's collision avoidance support system", Proc. of the 5th ITS Congress and Exhibition, Hannover, Germany.

- Forschungsgesellschaft für Strassen und Verkehrswesen (2002) "Handbuch für die Bemessung von Strassenverkehrsanlagen", Köln, Germany.

- Hall, F. L. (1993) "The investigation of an alternative interpretation of the speed- flow relationship for U.K. motorways", Traffic Engineering and Control, Vol. 32, No. 9.

- Nicholas, H. and Novara (1994) "Speed – flow relationship and side friction on Indonesian urban highways", Proceeding of the Second International Symposium on Highway Capacity.

- Nicholas, J. and Lester, A. (2010) "Traffic and highway engineering", 4th edition, University of Virginia, USA, Cengage Learning.

- Roess, Roger P., Prassas, Elena S. and Mcshane, William R. (2004) "Traffic engineering" 3rd Edition, Prentice Hall.

- Rotwannasin, P. and Choocharukul, K. (2005)

www.SID.ir